
De la simulation de l'embroussaillement à un outil d'aide à la gestion de l'espace.

Un modèle des transformations de l'espace.

Sylvie Lardon* — Pierre Bommel** — François Bousquet*** —
Christophe Le Page*** — Thérèse Libourel** — Robert Lifran
**** — Pierre-Louis Osty*****

*INRA-SAD, 2, place Viala, 34060 Montpellier Cedex 02, lardon@ensam.inra.fr
**LIRMM, 161, Rue Ada, 34391 Montpellier Cedex 5, {bommel, libourel}@lirmm.fr
*** CIRAD-TERA, Centre Baillarguet, BP 5035, 34032 Montpellier cedex 1,
{bousquet, lepage}@cirad.fr
****INRA-ESR, 2, place Viala, 34060 Montpellier Cedex 02, lifran@ensam.inra.fr
*****INRA-SAD, BP 27, Auzeville, 31326 Castanet Tolosan Cedex,
ploesty@toulouse.inra.fr

RÉSUMÉ : Les systèmes multi-agents (SMA) sont adaptés à la modélisation des systèmes complexes, car ils prennent en compte des interactions et permettent de simuler des dynamiques. La gestion de l'espace renvoie aux caractéristiques propres de l'espace et aux représentations que les acteurs s'en font. Nous avons modélisé les concepts d'agrégation spatiale et de généralisation à l'aide du formalisme objet et nous les avons implantés dans une plate-forme de simulation multi-agents, par des entités spatiales génériques. Le modèle ForPast les utilise pour la problématique de l'embroussaillement. Il fournit une évaluation de l'efficacité de stratégies de pâturage selon les configurations spatiales initiales du paysage végétal, dans un univers virtuel et est mis à l'épreuve de situations réelles. Les fonctionnalités SMA combinées aux concepts spatiaux sont le support d'une modélisation adaptée à la gestion de l'espace, pour représenter des phénomènes et simuler des scénarios.

ABSTRACT: Taking into account interactions and simulating dynamics, the MSA are adapted to modelize complex systems. In case of land-use management, the characteristics of the space and the perception of actors are important. We formalize the concept of spatial aggregation and generalisation and we implement generic spatial entities in a simulation platform. The ForPast model uses it, applied to the control of encroachment in the Grands Causses region. It evaluates the efficiency of grazing strategies according to vegetation configurations, in a virtual universe, then in real situations. By representing phenomena and simulating scenarii, this MAS integrating space concepts is a good support for land-use management.

MOTS-CLÉS : Objets spatiaux, Stratégies, Agrégation, Dynamique spatio-temporelle, Modèle

KEY WORDS: Spatial objects, Strategies, Agregation, Spatial and temporal dynamics, Model

1. Introduction

Les problèmes d'environnement rendent nécessaire la modélisation des systèmes complexes [BLA 97]. En effet, les interactions entre les processus naturels et les activités humaines doivent être prises en compte, ainsi que les dimensions spatiales et temporelles, car elles déterminent les transformations des processus et des activités. De plus, il ne s'agit pas seulement de comprendre les phénomènes, mais aussi d'agir pour les maîtriser. Or on ne peut pas dissocier ces deux types de connaissance et attendre d'avoir tout compris pour agir ! La gestion de l'espace rural et plus particulièrement la maîtrise de l'embroussaillage dans la région des Grands Causses est un bon exemple de la complexité des problèmes à résoudre [COH 00].

Les systèmes multi-agents [FER 95] nous semblent de bons instruments pour ce type de modélisation, car ils modélisent des agents, simulent des évolutions temporelles et permettent d'expérimenter virtuellement des situations non observables pour mieux comprendre les phénomènes à l'œuvre [TRE 97a]. Cependant, une attention particulière doit être portée à la modélisation des processus, à la prise en compte de l'espace et à l'accompagnement d'actions. C'est pourquoi nous avons implanté un modèle de simulation multi-agents articulant des dynamiques naturelles et humaines, sur la base d'un modèle de conception de l'espace pris comme un facteur de ces dynamiques, pour instrumenter un outil d'aide à la gestion.

La section 2 fait le point des avancées récentes dans le champ des systèmes multi-agents pour la modélisation des systèmes complexes et pointe les limites des modèles actuels pour répondre à une problématique telle que celle de l'embroussaillage, qui nécessite de considérer les interactions entre les activités et processus, et l'espace.

La section 3 présente le modèle de conception de systèmes d'information spatiaux et la formalisation d'entités spatiales génériques. Le modèle ForPast de simulation des interactions entre dynamiques de végétation et stratégies de pâturage est ensuite succinctement décrit. La simulation de cas virtuels est alors confrontée aux observations de terrain, dans la région des Grands Causses.

La section 4 argumente l'intérêt d'une telle maquette de simulation pour accompagner des projets de gestion de l'espace et évalue les perspectives ouvertes par ce type de modèles.

2. Les SMA et la maîtrise de l'embroussaillage.

Parmi les modèles existants dans le champ des SMA, nous nous intéressons à ceux qui prennent en compte explicitement la dimension spatiale des phénomènes, du fait de son importance dans la problématique de l'embroussaillage.

2.1. Les SMA Spatialisés

Le colloque SMAGET 98 sur *les modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires* a fourni l'occasion à la communauté scientifique de faire le point sur les travaux actuels [FER 98]. Les premières applications ont porté sur des agents situés qui se déplacent sur un espace support de ressources [DRO 00]. La spécificité des approches récentes est de considérer également que ces ressources évoluent au cours du temps. C'est le cas de populations de poissons pour les phénomènes de reproduction [LEP 97] ou de la chasse dans l'Est-Cameroun [BAK 97]. L'espace est vu comme un support de ressources, discrétisé dans un automate cellulaire ; lorsqu'un agent collecte des ressources il modifie l'environnement commun. Mais l'environnement peut également agir sur les agents du système, en modifiant leur capacité de survie, comme dans le cas de la mobilité des troupeaux [BAH 98]. Ainsi, pour des applications portant sur les interactions entre acteurs et espace, il est nécessaire de considérer l'espace comme un facteur et comme un produit des activités. L'espace peut être vu comme un ensemble d'entités géographiques qui peuvent interagir entre elles [BOU 99]. Cette vision de l'espace permet de simuler des comportements agrégés au niveau des objets spatiaux. Il est même possible de conserver dans le modèle les deux visions de l'espace, comme élément ou comme objet agrégé et de choisir le niveau privilégié pour exprimer la dynamique. Ainsi, un ensemble de gouttes d'eau peut aussi être vu comme une mare, dans la simulation du ruissellement sur un bassin-versant [TRE 97b]. Plus encore, on peut considérer l'espace comme un objet médiateur et construire des architectures de système sur cette notion, pour rendre compte à la fois de l'univers subjectif (celui des comportements et des décisions des agents du système) et de l'univers objectif (celui de l'observateur extérieur) [TRE 98]. Ainsi, le projet Rivage [SER 98] propose une architecture informatique générique de simulateurs multi-agents permettant d'assurer la coexistence d'agents relevant de niveaux d'abstraction et de structuration différents et dont l'activité collective fait émerger de nouveaux agents. La représentation des différents niveaux est explicite et les relations qui existent entre eux sont spécifiées (contraintes, conditions d'émergence, ...).

Se focalisant sur les interactions entre la dynamique écologique et la dynamique sociale, et partageant un certain nombre de points communs, la construction de ces modèles multi-agents a été l'occasion de réfléchir sur une méthodologie de modélisation d'accompagnement [BOU 97]. La plate-forme de simulation *Cormas* (Common-pool Resources and Multi-Agent Systems) permet de regrouper, au sein d'un même outil générique, les fonctionnalités spécifiques au problème de la gestion des ressources [BOU 98]. Programmée en langage orientée-objet, *Cormas* propose un certain nombre d'entités génériques pré-définies desquelles les agents spécifiques à chaque modèle doivent hériter. La première étape de la modélisation est la spécification des entités qui composeront le modèle. Une fois spécifiés les caractéristiques (attributs) et le comportement (méthodes) de chacune des entités de base, la seconde étape consiste à définir la dynamique des interactions entre entités.

Ceci réfère à des problèmes d'ordonnancement qui spécifient l'ordre dans lequel les différents agents, entités spatiales et sociales, vont interagir. La troisième étape concerne la définition de points de vue d'observation des entités du modèle. Un point de vue sur une entité est une méthode qui associe une image à telle condition sur les valeurs des attributs de cette entité. Lors d'une simulation, l'utilisateur sélectionne pour chaque entité un point de vue particulier.

Nous avons enrichi la formalisation des entités spatiales dans Cormas pour représenter les notions d'agrégat et de collection d'objets spatiaux [LEP 99]. Nous disposons ainsi d'une plate-forme de simulation permettant de représenter à la fois des agents acteurs du système et des agents objets spatiaux, pour mieux rendre compte des phénomènes où les activités humaines interagissent avec les processus naturels, comme dans les problèmes d'embroussaillage.

2.2. L'embroussaillage des Grands Causses

L'embroussaillage sur les Grands Causses est l'un des problèmes majeurs des gestionnaires de l'espace. Les possibilités offertes par la simulation multi-agents sont prometteuses, dans la mesure où elle permet de rendre compte de dynamiques naturelles, d'expérimenter des stratégies de maîtrise et d'évaluer différents scénarios. Les connaissances sur lesquelles nous nous appuyons relèvent de l'écologie et de l'agronomie, car l'embroussaillage met en cause des processus de diffusion des ligneux, pins et buis, plus ou moins contrôlés par des stratégies de pâturage, du fait de l'utilisation importante de ces espaces par des élevages ovins extensifs [LAR 95]. La végétation présente des patrons de répartitions agrégés ou dispersés, plantations de ligneux en massif ou répartition diffuse des semenciers (pins), buissons denses ou semis de jeunes plantules (buis). De même, si le gardiennage permet de répartir les troupeaux sur de grands espaces pâturés, les tendances actuelles vont vers la mise en parc selon un maillage parcellaire plus serré, selon différentes stratégies d'organisation de l'espace en lien avec les fonctionnements techniques des exploitations agricoles [LAR 00]. Coexistent donc dans l'espace des niveaux de structuration différents dont on peut faire l'hypothèse qu'ils évolueront différemment.

Or, il est difficile de raisonner à la fois localement et globalement, dans le temps et dans l'espace. C'est pourquoi nous avons besoin de simuler virtuellement la dynamique d'embroussaillage, issue de l'interaction entre la dynamique de végétation et celles des interventions humaines, pour mieux comprendre les phénomènes à l'œuvre et raisonner leur maîtrise. Il s'agit en effet d'une analyse prospective, prenant en compte simultanément les dynamiques et focalisant sur les objets spatiaux produits. C'est nouveau par rapport aux précédentes approches de modélisation qui développaient des analyses rétrospectives pour mettre en relation la végétation et les pratiques, avec des outils statistiques et cartographiques [MAT 96]. Nous mobilisons ici les outils de conception de systèmes d'information spatiaux

issus de la modélisation orienté objet et les outils de simulation de dynamiques en interaction, permis par les SMA. Nous simulons la dynamique d'embroussaillage comme la transformation d'objets spatiaux du paysage végétal et du paysage de production sous l'effet combiné de la dynamique de végétation et de la dynamique des interventions humaines. C'est ce que nous développons dans la section suivante.

3. Modéliser la dynamique d'embroussaillage

Le modèle conceptuel de paysage est tout d'abord décrit. Il sert à construire le modèle ForPast de simulation de la dynamique d'embroussaillage qui est ensuite confronté à des données de terrain.

3.1. Le modèle de conception de Systèmes d'Information spatiaux

La représentation des systèmes environnementaux demande de concevoir des systèmes d'informations adaptés. Elle nécessite la prise en compte de l'organisation structurelle des entités du monde réel au travers de filtres de perception hiérarchique. Le concept de groupe ou d'agrégat permet de structurer notre représentation de l'espace. Nous définissons plusieurs niveaux d'appréhension d'un territoire. D'une part le modèle propose plusieurs granularités. En ce qui concerne le paysage végétal, la granularité la plus fine coïncide au faciès élémentaire, la plus large correspond aux grands types végétaux présents sur le territoire (forêt, lande, etc.). D'autre part, plusieurs thèmes sont considérés, en complément du paysage végétal, tel que le paysage de production, correspondant aux interventions de pâturage ou de coupe forestière sur l'espace ou le paysage d'exploitation, relatif à l'appropriation foncière de l'espace.

L'espace est vu non pas comme un champ continu mais comme un ensemble structuré d'objets spatiaux; Cela permet de bénéficier des fonctionnalités des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) telles que la superposition et l'agrégation de couches d'informations. L'analyse de la transformation de l'espace nécessite la prise en compte du temps. Le temps intervient sur la filiation des objets spatiaux (genèse de nouveaux objets), la modification de leurs formes et l'évolution de leur contenu. Les opérateurs spatio-temporels pour les bases de données géographiques ont été spécifiés [LAR 99]. Nous avons formalisé les notions d'agrégation spatiale et de généralisation, appliquées à la problématique d'embroussaillage [BOM 00b].

Ce diagramme (fig 1.) permet de concevoir l'espace comme une hiérarchie d'objets végétaux (fig. 2.). Il est construit sur une typologie grossière de la végétation en 4 types : pelouse, lande, pré-bois et forêt, que l'on peut assimiler à des aspects végétaux. Chaque surface élémentaire végétale réalise à un moment donné,

un unique aspect : une cellule de pelouse, une cellule de forêt, ... Ainsi, un groupe de cellules de forêt connexes, par exemple, forme un agrégat N1 de type forêt, ayant une surface, une forme et une position dans l'espace. Partant des 4 catégories végétales définies au niveau élémentaire, on rencontre 4 types d'agrégat N1. De même que la collection de toutes les forêts définit un agrégat N2, encore appelé la forêt du paysage végétal, on définit 3 autres types de collections végétales : la pelouse, la lande et le pré-bois. Enfin, un paysage végétal, constitué de ces 4 collections, forme une partition exhaustive de l'espace. Cet agrégat N3 est un objet établi sur la base de la catégorisation initiale du thème végétal.

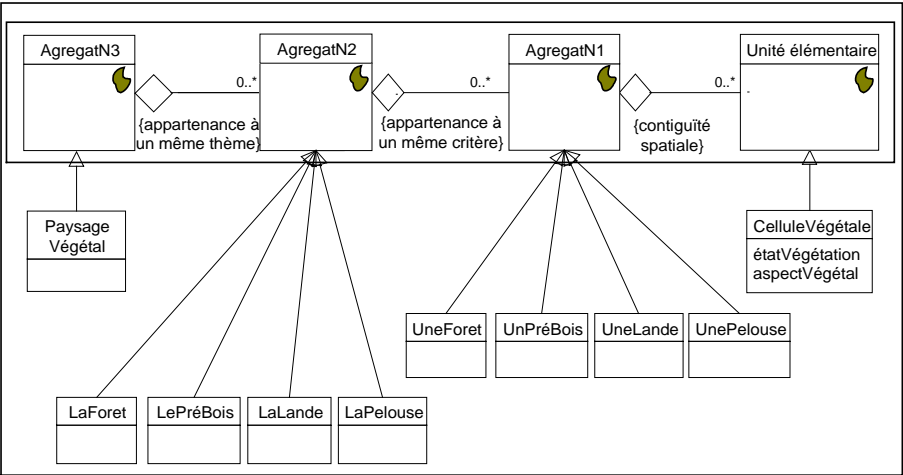


Figure 1. Diagramme de classe du paysage végétal

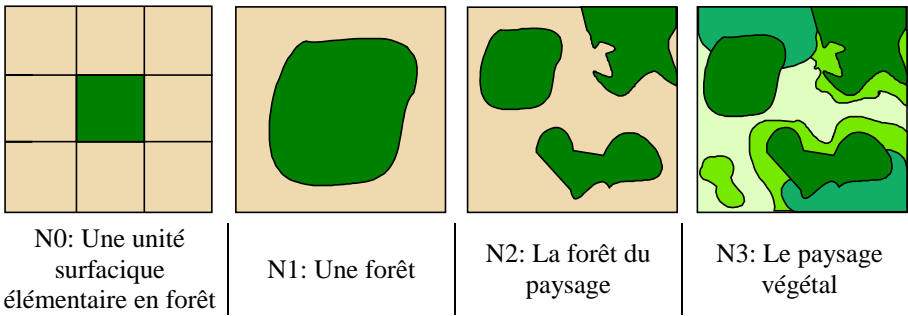


Figure 2. Les quatre niveaux hiérarchiques des objets spatiaux, appliqués au thème végétal.

Ce « patron » est générique et peut être appliqué à d'autres perceptions du paysage (fig. 3.), selon des points de vue utilisateur différents : la production qui permet de voir l'espace selon l'activité des producteurs (les pâtures d'un éleveur, les zones de coupe forestière d'un forestier, ...) et l'exploitation coïncidant à l'appropriation foncière du territoire. La stratégie du producteur (s'il est éleveur) consiste à répartir des moutons sur l'espace, selon les caractéristiques de ses pâtures, qui sont souvent pour lui des objets de niveau 1, mais peuvent être considérés aux niveaux hiérarchiques inférieur ou supérieur. De même, compte tenu de son statut (propriétaire ou fermier), l'exploitant considérera son territoire d'exploitation aux différents niveaux d'agrégation possibles (parcelles, quartiers, exploitation). Dans l'application suivante, nous considérons le paysage d'exploitation comme fixe, par contre nous suivons la dynamique du paysage végétal et la constitution du paysage de production (pâtures). L'acteur joue les différents rôles d'observateur du paysage végétal, de producteur du paysage de production et d'exploitant du paysage d'exploitation, qui constituent le même territoire.

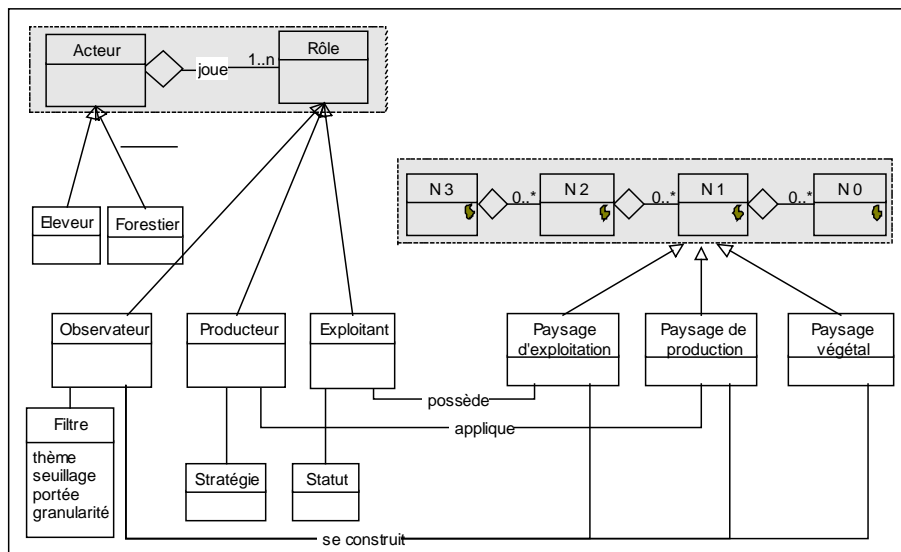


Figure 3. *Patrons génériques de l'agrégation spatiale et de la généralisation (par la notion de rôle).*

L'implantation de ces entités génériques dans la plate-forme *Cormas* permet de bénéficier, dans un même environnement informatique, à la fois des fonctionnalités d'héritage des classes et de mise à jour dynamique appliquées aux objets spatiaux [LEP 99].

3. 2. *Le modèle de simulation de la transformation d'objets spatiaux*

Le modèle ForPast simule l'embroussaillage comme l'effet combiné de dynamiques de végétation et de dynamique de pâturage [LAR 98]. Le suivi de la transformation de l'espace se fait par la description des configurations spatiales sous l'effet de stratégies de pâturage contrastées. Nous avons testé et évalué quelques cas types de situations virtuelles, pour évaluer l'efficacité de différentes stratégies et l'effet de configurations initiales dans la dynamique du phénomène [BOM 00a]. Dans cette phase de modélisation, les stratégies sont fixes et les configurations sont générées automatiquement. Toutes les simulations sont menées sur une grille composée de 900 cellules (30 x 30), avec un stock de 300 moutons, sur 50 pas de temps. Cela représente une situation virtuelle où la dynamique d'embroussaillage est forte, pour pouvoir être observable à l'aide du simulateur.

Pour représenter la croissance et la dissémination des espèces, nous modélisons la dynamique de végétation au niveau de granularité le plus fin, les unités surfaciques élémentaires ou cellules, dont l'ensemble forme un automate cellulaire. Il constitue de ce fait le support fonctionnel de la dynamique de la végétation. Les deux principaux modes de propagation des espèces, endémiques et épidémiques, ont été caricaturés par deux processus de croissance et de diffusion. La croissance consiste à augmenter l'état d'embroussaillage de 1 à chaque pas de temps (un an), sur toutes les cellules. Lorsque les cellules atteignent l'état 30, elles deviennent forêt et ne sont plus pâturables. Les cellules voisines d'une cellule en forêt augmentent de 2 unités d'embroussaillage, pour représenter le processus de diffusion.

Les acteurs humains agissant sur le territoire sont simulés par des agents informatiques, ici les éleveurs qui appliquent des stratégies de pâturage. Celles-ci résultent du choix des éleveurs à répartir spatialement la pression de pâturage; elle est de -1 ou de -2 en fonction du nombre de moutons que chaque éleveur place par cellule. Les stratégies sont fixes au cours d'une simulation.

Le simulateur modifie à chaque pas de temps l'état des cellules en tenant compte de la pression de végétation et de la pression de pâturage. On peut formaliser l'évolution de l'état d'embroussaillage d'une cellule de la manière suivante :

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + C_{i,j}^t + D_{i,j}^t - E_{i,j}^t$$

avec X = état d'embroussaillage,

C = taux de croissance végétale (1),

D = taux de diffusion végétale d'une cellule voisine en forêt (0 ou 1),

E = prélèvement par les moutons (0, 1 ou 2).

Nous avons exploré 17 configurations initiales de végétation et défini 9 stratégies de pâturage contrastées, permettant d'encadrer les situations réelles observées sur le terrain et réalisé une première évaluation des interactions entre végétation et pâturage.

Les configurations initiales ont été contrastées selon les lois de *distribution* des états d'embroussaillage et les lois de *répartition* de ces états dans les cellules. Elles représentent des caricatures de configurations existant sur le terrain. Les distributions, plus ou moins homogènes, restituent la diversité de la végétation et les répartitions rendent compte des structures en semis, en bosquet ou en massif. Elles permettent de tester si le niveau de structuration du paysage a des effets sur l'efficacité du contrôle de l'embroussaillage.

Nous avons généré cinq distributions symétriques et homogènes autour de l'indice de végétation moyen (15), qui est la moyenne des états possibles (entre 0 et 30). A partir de chaque distribution des états d'embroussaillage (hormis la distribution où tout est à 15), nous avons réparti les cellules sur la grille selon quatre répartitions, de la moins à la plus structurée : aléatoire, agrégats de taille 4 ou 12 et gradient. Visuellement, ces configurations initiales sont assez discernables (fig. 4.).

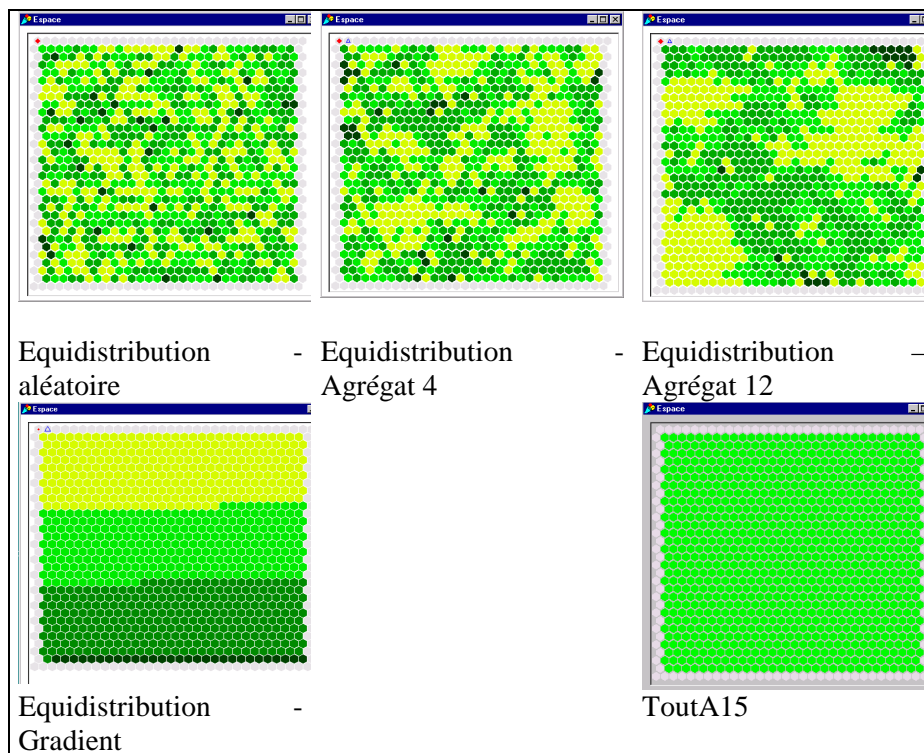


Figure 4 : Exemple de configuration initiale pour l'équidistribution (autant de cellules de chaque état entre 0 et 30) et ToutA15.

Nous avons caricaturé les stratégies pour rendre compte des pratiques observées sur le terrain. Elles s'appliquent à différents niveaux d'agrégation. Elles permettent de tester si le niveau d'agrégation des objets de gestion de l'éleveur et de sa perception de l'embroussaillage a un effet sur l'efficacité de son intervention.

Nous avons fixé le nombre de moutons à répartir à 300, pour un seul éleveur qui possède tout l'espace d'étude. Cela nous met dans une situation où la seule pression de pâturage ne peut contrôler la dynamique de végétation. Les 50 pas de temps de la simulation sont alors suffisants pour analyser le comportement du système. Le témoin est fourni par la dynamique de végétation sans intervention humaine. Trois types de stratégies ont été simulées, celles qui s'appliquent au niveau des cellules, selon une répartition aléatoire ou localisée sur les cellules les plus embroussaillées, celles qui s'appliquent globalement à des entités agrégées, ciblées sur les bordures de forêt ou sur les pelouses les plus compactes et celles qui tiennent compte finement, à l'échelle de la cellule, des caractéristiques d'embroussaillage d'entités spatiales agrégées telles que les pelouses.

Les résultats de la simulation sont évalués sur la base de trois critères : critère d'état (embroussaillage moyen après 50 pas de temps), de temps (temps de fermeture maximum du paysage) et d'espace (taille de la forêt). On peut en rendre compte par le suivi de ces critères au cours du temps (fig. 5.) et par les configurations auxquelles on aboutit (fig. 6.).

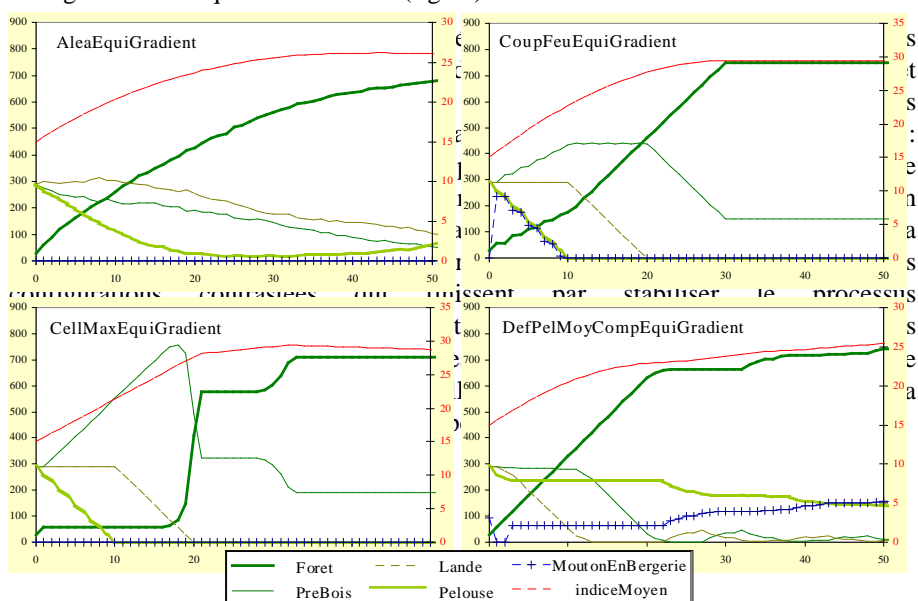


Figure 5. Suivi de l'indice d'embroussaillage moyen et de la taille des agrégats N2, au cours de 50 pas de temps de simulation (état initial équidistribué en gradient, selon 4 stratégies : aléatoire, localisée, ciblée sur la forêt ou ciblée sur la pelouse).

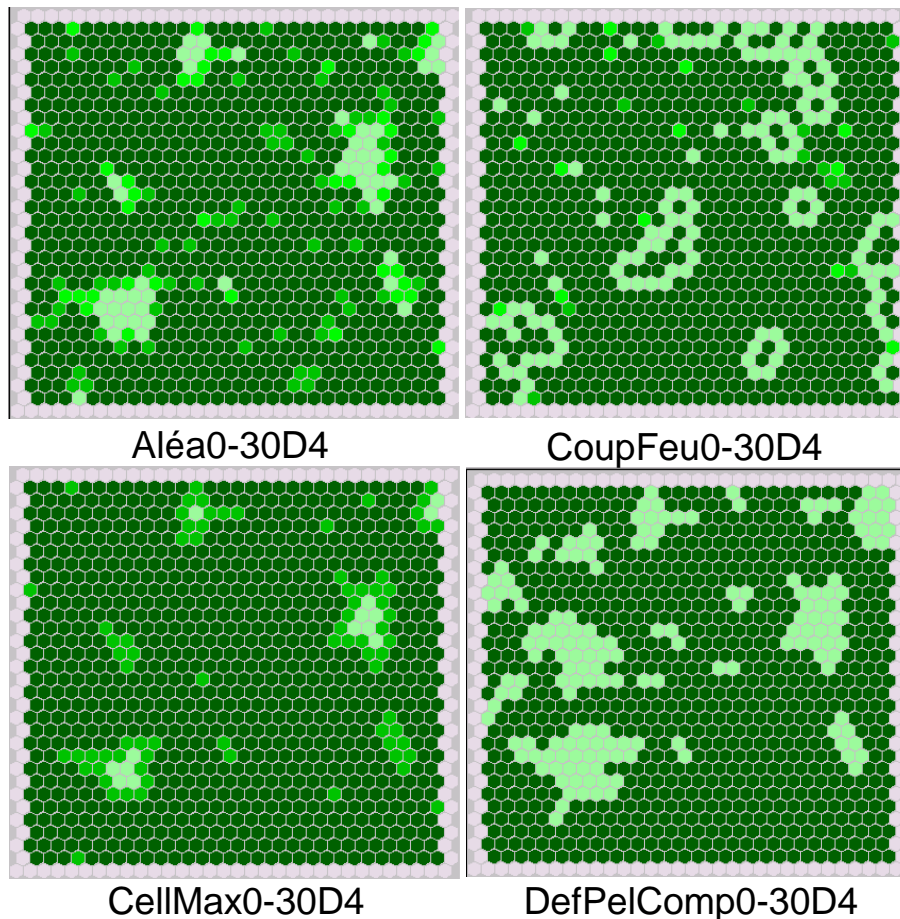


Figure 6 : Etat final après 50 pas de simulation pour une configuration en agrégats contrastés de taille 4 , pour différentes stratégies : aléatoire , localisée, ciblée sur la forêt ou ciblée sur la pelouse.

3. 3. La gestion de l'embroussaillage sur le Causse Méjan

Cette simulation virtuelle conforte les éléments de connaissances issues de l'analyse de terrain, qu'il est bien difficile de vérifier expérimentalement. Nous nous appuyons sur le cas du Causse Méjan [LAR 95], [LAR 00].

Les paysages y sont contrastés. A l'Est domine un paysage de pelouses steppiques, parfois troué par des plantations de pins noirs ou piqué par des buissons de buis. A l'Ouest, l'embroussaillage est plus prononcé et la dynamique de végétation est forte, avec un fort taux de diffusion naturelle de pins sylvestre et

une forte avancée du front vers l'Est. On retrouve ainsi la gamme des configurations caricaturées.

Sur les 30 dernières années, les pratiques de pâturage y sont diversifiées. Traditionnellement, les bergers gardaient les troupeaux et l'impact était réparti sur tout l'espace. L'abandon de ces pratiques est interprété par le Parc National des Cévennes comme une perte de maîtrise de l'espace; il préconise de reprendre ces pratiques anciennes. Or on peut se demander si ce ne sont pas justement ces pratiques qui sont à l'origine de l'explosion actuelle de la dynamique de végétation, le seuil de maintien étant maintenant dépassé, comme la simulation l'a montrée. Avec le temps, l'impact global des troupeaux s'est maintenu, mais il s'est différencié dans l'espace. L'impact diminue là où la végétation est diffuse et les stratégies des éleveurs évoluent vers des répartitions plus ciblées, principalement dans les zones à pelouses. C'est dans ce sens que se font les préconisations des Organismes Professionnels Agricoles, dans le cadre des mesures agri-environnementales. Il convient de cibler les lieux et les saisons d'utilisation du territoire, comme pour les stratégies les plus efficaces dans la simulation.

L'analyse de la situation de trois exploitations agricoles limitrophes d'une plantation de pins noirs, sur environ 2000 ha à l'Est du Causse Méjan et sur les 30 dernières années, souligne nos conclusions. Le boisement appartient à un seul propriétaire, mais le plan de gestion est sous la responsabilité de la l'administration forestière, qui définit les dates et les intensités d'éclaircie. Les trois exploitations ont des structures d'exploitation qui s'étendent du Nord au Sud. Elles ont des stratégies différenciées (fig. 7.). L'exploitation à l'Ouest (1) développe une stratégie ciblée sur des entités agrégées, connues globalement, alors que l'exploitation à l'Est (3) répartit aléatoirement sa charge sur les parcelles proches et en fonction de la distance pour les parcelles éloignées. L'exploitation intermédiaire (2) module sa stratégie en combinant à la fois une connaissance fine du milieu et une répartition par agrégat. Ces différences de stratégie sont marquées par la localisation et la saisonnalité de l'utilisation du territoire.

La végétation, suivie sur photographies aérienne, est contrastée. Elle présente un gradient Sud/Nord et des hétérogénéités locales dues aux plantations de pins et au buis. On constate au cours du temps que le taux d'embroussaillage amplifie le gradient de végétation initial Sud/Nord, correspondant à des taux de semenciers différents. Ainsi par exemple, la même stratégie de l'exploitation 2 ne maîtrise la végétation que jusqu'à un certain seuil, marqué sur le terrain. D'autres interventions seraient nécessaires dans les zones les plus denses et soumises à une forte dynamique de diffusion, telles qu'au Nord. Mais on observe également que le taux d'embroussaillage suit un gradient Ouest-Est, lié aux territoires des exploitations, la zone la plus faible correspondant à l'exploitation 1 qui développe la stratégie la plus ciblée. Ainsi, il existe des stratégies plus ou moins adaptées à des densités et des vitesses de végétation différentes. Cependant, la variabilité locale des terrains et la présence de sites particuliers modulent l'efficacité du pâturage.

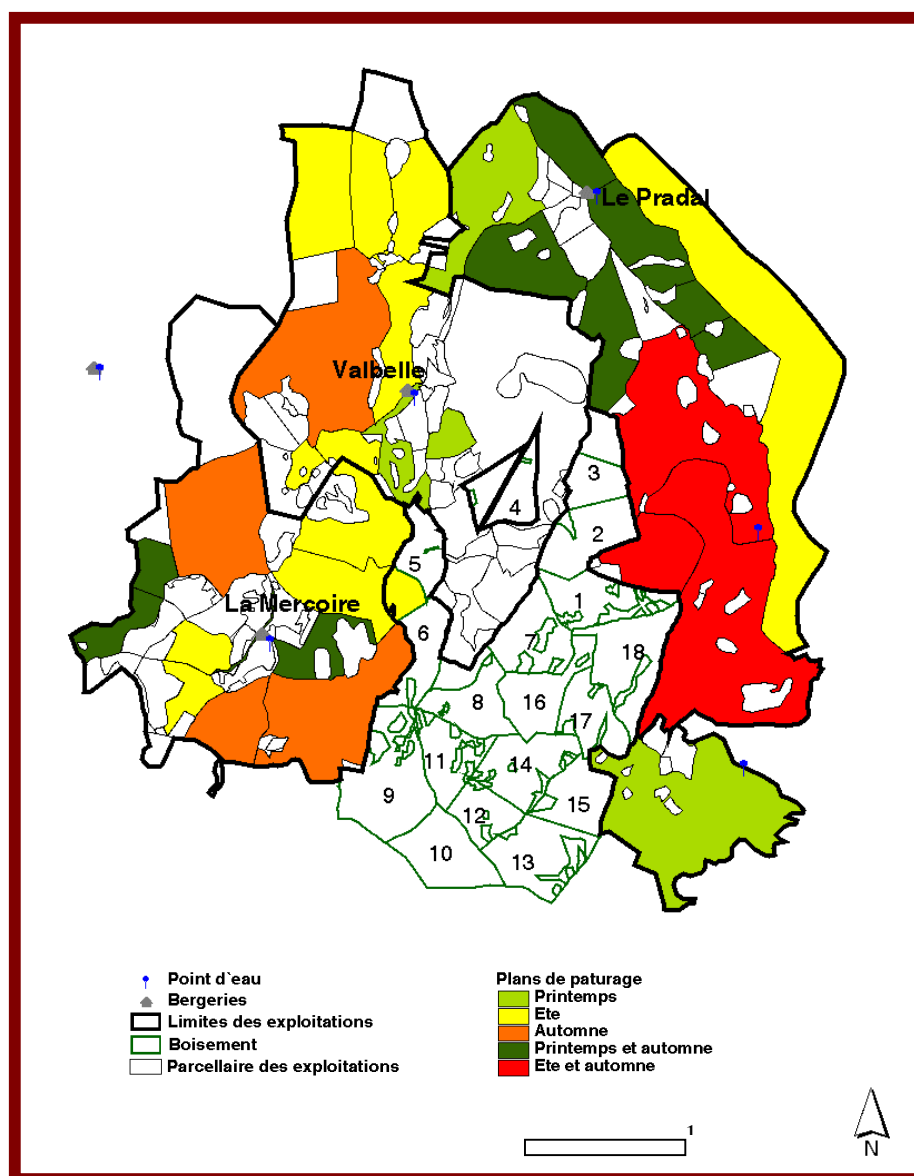


Figure 7. *Stratégies d'utilisation du territoire différenciées selon les exploitations.*

Ces premiers résultats sur la base d'une situation virtuelle amènent plusieurs réflexions sur la diversité des situations, l'évolution dynamique et le choix des interventions. Tout d'abord, force est de constater que la réalité prend des expressions diverses, qu'il est bien difficile d'expliquer par une simple description. Or, avec des formalisations simplifiées, nous recréons cette diversité, tant dans les configurations que dans les stratégies, ce qui nous permet d'étudier les situations réelles et de les encadrer. Ensuite, nous observons une évolution incessante : pour être stable, il faut changer. La même stratégie n'est pas efficace de la même façon au cours du temps, car la configuration a changé. Cela conduit à rechercher des stratégies évolutives, qui s'adaptent à la situation dans un équilibre dynamique. Enfin il est clair que les seules interventions de pâturage ne peuvent contrer une dynamique de végétation déjà bien enclenchée et que les éleveurs ne sont pas seuls en cause dans le processus. D'autres interventions peuvent être envisagées, de la part d'autres acteurs tels que les forestiers et les collectivités territoriales, mais quoi qu'il en soit, il faudra cibler l'impact car on ne peut pas tout maintenir. En terme de gestion de l'espace, cela oriente vers de nouvelles façons de maîtriser le problème d'embroussaillage, en accompagnant la dynamique plutôt qu'en la contraindant et en ciblant l'impact sur les formes plutôt que sur les densités. Ce sont des scénarios à explorer et la maquette ForPast peut en être le support.

4. Les systèmes multi-agents spatiaux : des modèles intégrés ?

Nous avons montré qu'en l'état, la maquette informatique permet de raisonner des stratégies en fonction de configurations spatiales. Elle sert de catalyseur et interroge en retour les connaissances disciplinaires. Elle fournit aux acteurs des éléments objectifs, comme support de leurs choix. Elle est générique et peut s'appliquer à d'autres problèmes d'environnement et de développement. Elle s'inscrit dans la tendance nouvelle à la constitution d'un corpus autonome d'outils et de techniques de modélisation basée sur les systèmes multi-agents, pour la simulation de problèmes environnementaux [DRO 93], [DRO 00].

L'intérêt de cette formalisation est tout d'abord que l'on peut modéliser, dans une même plate-forme informatique à la fois les agents (humains ou animaux) et les objets spatiaux sur lesquels ils interviennent. Cela permet de mieux rendre compte des interactions entre les activités et l'espace. On pourra par la suite déléguer à un logiciel dédié, par exemple un SIG, les procédures de calculs typiquement spatiaux, telles que les calculs de distance ou d'intersection de couches [LIE 99]. Cela ouvre la possibilité de prendre en compte les caractéristiques de l'espace, telles que les différences de sols, l'effet de la pente ou l'existence d'obstacles, pour mieux représenter les phénomènes dans leur variabilité locale.

Ensuite, la double vision de l'espace, comme un ensemble de cellules ou comme un ensemble d'agrégats, permet de se positionner au niveau spatial où le processus est le plus pertinent, ou le plus informé, sachant que les processus naturels et

humains n'agissent pas obligatoirement aux mêmes niveaux, mais interagissent entre eux. Les cellules, considérées comme des entités élémentaires, rendent souvent compte des dynamiques naturelles, les interventions humaines s'appliquant généralement à des entités composées, unités de propriété ou de gestion qui ont du sens en tant que telles. Cela ouvre la possibilité d'améliorer les connaissances disciplinaires, telles que le processus de diffusion à distance ou l'élaboration de stratégies mixtes, pour mieux représenter les phénomènes dans leurs logiques propres.

Enfin, la formalisation d'entités génériques, avec leur état et leur comportement, permet de modéliser différentes situations tout en tenant compte de leur spécificité. Généralisation et spécialisation sont donc à la fois possible. C'est particulièrement important dans le contexte de la simulation des systèmes complexes où les expérimentations virtuelles servent à construire l'argumentaire scientifique, par la méthode des modèles [LEG 97]. Cela ouvre la possibilité de se placer dans des conditions où le modèle d'interaction peut être mis à l'épreuve, comme dans les approches biométriques plus classiques. On touche à la validation des modèles, qui reste encore un champ de questions ouvertes en ce qui concerne les systèmes multi-agents.

Ainsi, l'intégration des fonctionnalités SMA et des concepts spatiaux dans la même maquette de simulation ouvre de nouvelles perspectives de modélisation. Nous avons posé les bases d'une modélisation où les acteurs et l'espace sont des agents du système. Après cette première étape de formalisation de l'espace, nous pourrions amplifier ces acquis en mobilisant les fonctionnalités plus classiques des SMA, celles de rendre compte des interactions entre acteurs, en considérant plusieurs acteurs et en faisant évoluer les stratégies par apprentissage. Ce SMA spatial permet de mobiliser à la fois une approche globale et locale, des observations et des interprétations, des méthodes de description et de validation. L'interactivité de la plate-forme informatique et la généricité des entités formalisées ajoutent encore à son utilité.

5. Conclusion

Les applications que nous commençons à développer nous montrent la richesse des possibilités de modélisation qui nous sont ouvertes dans le champ de l'environnement [JOL 92]. Il nous semble avoir ainsi les moyens d'instruire trois types de questions importantes :

Comment l'espace agit-il sur les actions humaines ? Trop longtemps on a considéré les interventions humaines comme des perturbations d'un système naturel ; on n'a pas pris la mesure des transformations en retour que le milieu pouvait avoir sur les stratégies des hommes. Nous avons là les moyens de considérer conjointement la double relation milieu-société.

Comment imaginer de nouvelles modalités d'action ? Le propre de ce type de simulation n'est pas de faire des modèles prédictifs mais bien de générer toute une gamme de possibles, sur lesquels les décideurs pourront raisonner. Or les nouvelles configurations spatiales peuvent faire émerger de nouvelles stratégies. C'est particulièrement important dans les phénomènes d'environnement, qui sont évolutifs et ne peuvent être résolus une fois pour toutes [GOD 92].

Comment évaluer la production d'espace ? La demande sociale, en terme d'aménités de l'espace est de plus en plus forte, mais nous manquons de concepts pour évaluer l'adéquation entre les souhaits et les réalisations. La mesure de la transformation de l'espace, à différents niveaux, fournit un ensemble de critères qui peut donner du sens, à la fois en termes bio-physiques et en termes socio-économiques.

Remerciements

Le CNRS, par le programme PSIG, a assuré le soutien financier pour l'élaboration du modèle, différents programmes INRA ont servi à l'élaboration des connaissances de base sur les processus d'embroussaillage et sur les stratégies de pâturage.

Nous remercions P. Monestiez et J. P. Vila, pour leurs remarques constructives dans le champ de la biométrie ainsi que P. Reitz et C. Baron, dans le champ de l'informatique.

Bibliographie

- [BAH 98] BAH A., CANAL R., D'AQUINO P., BOUSQUET F., 1998. « Les Sma génétiques pour l'étude de la mobilité pastorale en zone intertropicale sèche ». Colloque SMAGET Clermont-Ferrand, 5-8/10/98. 10p.
- [BAK 97] BAKAM I., TAKFORIAN A., PROTON H., BOUSQUET F., WEBER J., 1997. « Simulations spatio-temporelles d'interactions entre chasseurs et ressources par les systèmes multi-agents : illustration par le cas de la chasse dans l'Est-Cameroun ». In : gestion de la faune sauvage et usages de l'espace dans les paysages ouverts. Actes de colloque, Lyon.
- [BLA 97] BLASCO F. (coord.), 1997. Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement. Journées du programme Environnement, Vie et Société du CNRS. Elsevier Paris, 445p.
- [BOM 00a] BOMMEL P., LARDON S., 2000. Impact des activités rurales sur le paysage. Exploration des interactions de dynamiques de végétation et de stratégies humaines à l'aide d'un simulateur. Numéro spécial Géomatique : SIG et simulations (à paraître).

- [BOM 00b] BOMMEL P., LIBOUREL T., LARDON S., 2000. Conception objet dans le cadre des systèmes d'information spatiaux. Agrégation spatiale et généralisation. 12p. Conférence INFORSID.
- [BOU 97] BOUSQUET F., BARRETEAU O., MULLON C., WEBER J., 1997. « Modélisation d'accompagnement: Systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables ». In: *Quel environnement au XXIème siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie*. Proceedings of a workshop at the Abbaye de Fontevraud.
- [BOU 98] BOUSQUET F., BAKAM I., PROTON H., LE PAGE C., « *Cormas : Common-Pool Resources and Multi-Agent Systems* », *Actes de la 11^e Conférence Internationale sur les applications industrielles et d'ingénierie de l'Intelligence Artificielle et des Systèmes Experts*, Benicàssim, Castellon, Espagne, 1-4 juin 1998, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, n° 1416, p. 826-837, Springer, Berlin.
- [BOU 99] BOUSQUET F., GAUTIER D., « Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches *spatiales* et *acteurs* », *CyberGéo*, <http://www.cybergegeo.presse.fr/modelis/bousquet/bousquet.htm>.
- [COH 00] COHEN M., LARDON S., FRIEDBERG C., OSTY P. L., 2000. Exploiter et conserver les parcours ovins du Causse Méjan : l'apport d'une recherche interdisciplinaire. In : *Systèmes écologiques et action de l'Homme*, Ed. CNRS, 28p(à paraître).
- [DRO 93] DROGOU, A. 1993. De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes: une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents. Thèse de doctorat de l'Université Paris 6.
- [DRO 00] DROGOU, A. 2000. Systèmes multi-agents situés. Dossier d'habilitation à diriger des recherches de l'Université Paris 6.
- [FER 95] FERBER J., 1995. Les systèmes multi-agents ; vers une intelligence collective. InterEditions, 522p.
- [FER 98] FERRAND, N. (Ed). 1998. Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires. Cemagref éditions. 466p.
- [GOD 92] GODARD O. & LEGAY J. M., 1992. Entre disciplines et réalités, l'artifice des systèmes. In : JOLLIVET M. (dir.) *Sciences de la nature, sciences de la société. Les passeurs de frontières*. Paris, CNRS Editions, pp 243-257.
- [JOL 92] JOLLIVET M., PAVE A., 1992. « L'environnement : questions et perspectives pour la recherche ». In *Lettres des programmes interdisciplinaires de recherche du CNRS*, 3: 5-29
- [LAR 95] LARDON S., OSTY P. L., TRIBOULET P., 1995. Elevage et éleveurs du Causse-Méjan (Lozère). Dynamique de mise en valeur et contrôle de l'espace. In : Bonniol J. L., Saussol A. (coord.) *Grands Causses. Nouveaux enjeux, nouveaux regards*. Fédération pour la Vie et la Sauvegarde du Pays des Grands Causses (Millau, 1993/10/21-23), pp. 219-242.
- [LAR 98] LARDON S., BARON C., BOMMEL P., BOUSQUET F., LE PAGE C., LIFRAN R., MONESTIEZ P., REITZ P., 1998. « Modéliser les configurations et les stratégies spatiales dans un système multi-agents pour la maîtrise de dynamiques d'embroussaillage ». *Actes du Colloque SMAGET Clermont-Ferrand*, 5-8/10/98, pp 169-185.

- [LAR 99] LARDON S., LIBOUREL T., CHEYLAN J. P., 1999. « Représentation du changement : Conceptualiser la dynamique des entités spatio-temporelles ». *Revue Géomatique*. 1999/1, 15p.
- [LAR 00] LARDON S., OSTY P. L., 2000. Time-space dimensions of farmers' practice : methodological proposals from surveys and modelling of sheep farming. Case studies in Southern Massif Central, France. Fourth European Symposium. European Farming and Rural Systems Research and Extension into the next Millenium. Environmental, Agricultural and Socio-economic Issues, Vollos, Greece, 3-7 April, 9p.
- [LEG 97] LEGAY J. M., 1997. L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode. INRA Editions, Sciences en question. 112p.
- [LEP 97] LE PAGE C., GINOT V., 1997. « Vers un simulateur générique de la dynamique des peuplements piscicoles ». In QUINQUETON, THOMAS, TROUSSE (eds.), JFIADSMA'97, Actes des 5^e Journées francophones. Hermès, Paris, pp. 189-209.
- [LEP 99] LE PAGE C., LARDON S., BOMMEL P., BARON C., BAH A., BAKAM I., BOUSQUET F., 1999. Entités spatiales génériques et modèles de simulation multi-agent. In : M. P Gleizes & P. Marcenac (eds), Ingénierie des systèmes multi-agents, actes des JFIADSMA'99. Hermès.
- [LIE 99] LIEURAIN E., « Couplage Cormas – Access – ArcView. Une étude de faisabilité à travers la construction d'un modèle de parcours de troupeaux dans les sectionnaux de St Georges de Lévejac ». Rapport de stage à l'INRA ESR, avril 1999, 24p.
- [MAT 96] MATHIEU N., COHEN M., FRIEDBERG C., LARDON S., OSTY P. L., 1996, Approches pour la modélisation des interactions entre dynamiques de la végétation, dynamiques sociales et techniques : confrontation des énoncés logiques et des méthodes. L'embroussaillage sur trois sites du Causse Méjan. In : *Tendances nouvelles en modélisation* (Journées du programme CNRS Environnement, vie et sociétés, Paris, 15-17 Janvier 1996), 7 p.
- [SER 98] SERVAT, D., PERRIER, E., TREUIL, J.P. 1998. When agents emerge from agents: introducing multi-scale viewpoints in multi-agents simulations. In *Proceedings of MABS'98*. LNAI, 1538. Springer-Verlag, pp.183-198.
- [TRE 97a] TREUIL J. P., MULLON C., 1997. Expérimentation sur mondes artificiels : pour une réflexion méthodologique. In Blasco (ed) *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*. Journées du programme Environnement, Vie et Société du CNRS. Elsevier Paris, pp 425-431.
- [TRE 97b] TREUIL J.P., PERRIER E., CAMBIER C., « Directions pour une approche multi-agents de la simulation de processus physiques spatialisés », *Actes des 5^e Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents JFIADSMA'97*, La Colle sur Loup, 2-4 avril 1997, Editions Hermès, Paris, p. 211-237.
- [TRE 98] TREUIL J.P., « Space Models and Agent-Based Universe Architectures », Actes de la 11^e Conférence Internationale sur les applications industrielles et d'ingénierie de l'Intelligence Artificielle et des Systèmes Experts, Benicàssim, Castellon, Espagne, 1-4 juin 1998, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, n° 1416, p. 795-804, Springer, Berlin.